

XXIII

ESTUDIO EXPERIMENTAL

SOBRE

LA CALIDAD Y CANTIDAD DE LOS RAYOS RÖNTGEN DIFUSOS

Y SU INFLUENCIA SOBRE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE LA RADIACIÓN TOTAL EN EL AGUA

POR EL DOCTOR FEDERICO VIERHELLER

Profesor suplente de Trabajos prácticos en física

ZUSAMMENFASSUNG

Experimental-Studium über die Qualität und Quantität der gestreuten Röntgenstrahlung und deren Einfluss auf Qualität und Quantität der Gesamtstrahlung im Wasser.

— 1. Es wird eine Versuchsanordnung beschrieben, die gestattet, die Qualität und Quantität der Streustrahlung im Wasser, getrennt von der Primärstrahlung zu messen.

2. Es ergibt sich Uebereinstimmung zwischen den beobachteten Werten einerseits und den berechneten anderseits, sowohl für die Qualität als auch für die Quantität der Streustrahlung.

3. Bei grossen und kleinen Strahlungs-piramiden wird ein Energie-maximum in einer Tiefe von ungefähr 1 cm bestätigt, das mit dem durchstrahlten Volumen zunimmt.

4. Für die Streustrahlung allein besteht dieses Maximum in einer Tiefe von 3 cm und scheint sich der Oberfläche des Wassers umsomehr zu nähern, je grösser die nicht von den direkten Strahlen getroffenen Volumina sind. Das Zusammenwirken der Primär- und Sekundärstrahlen ist die Ursache, dass sich das Maximum bereits in 1 cm Tiefe befindet.

5. Die Logarithmen der Ionisationströme, die durch die Streustrahlen hervorgerufen werden, sind denjenigen Volumen umgekehrt proportional, die nicht von direkten Strahlen getroffen werden, von ungefähr 0,5 Liter an.

Der abgeplattete Verlauf der Kurven zwischen 0 und 0,5 Litern ist verursacht, einerseits durch die Lage der Messkammer an der Oberfläche des Wassers, und anderseits durch den Ausfall der Streustrahlung oberhalb des Wassers.

6. Für die Qualität der Streustrahlung, die mit Hilfe der Duane'schen Methode bestimmt wird, folgt ein Minimum an allen Stellen, die ein Maximum der Quantität aufweisen.

Die effektive Wellenlänge der Streustrahlung ist wesentlich grösser, als diejenige der Primärstrahlung.

7. Wenn man für irgendein Volumen, welches nicht von direkten Strahlen getroffen wird die Qualität der Streustrahlung in irgend einer Tiefe innerhalb des Zentralstrahles kennt, so kann man mit Hilfe einer einfachen, angegebenen Gleichung die Qualität für die gleiche Tiefe, aber für ein anderes, nicht von direkten Strahlen getroffenes Volumen berechnen. Die Qualitäten sind umgekehrt proportional dem Quadrate der mittleren Weglänge, die die Streustrahlen bis zum Zentralstrahl zurückzulegen haben, wenn die Qualität nach der Duane'schen Methode bestimmt wird. Für das Grenzvolumen, das nicht von direkten Strahlen getroffen wird, also 0 cm³, gibt die Rechnung allein die Qualität.

8. Die Qualität der Gesamtstrahlung bleibt konstant von ca 4 cm an, verliert aber ca 10 % bezogen auf die effektive Wellenlänge der Primärstrahlung.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

SOBRE

LA CALIDAD Y CANTIDAD DE LOS RAYOS RÖNTGEN DIFUSOS

Y SU INFLUENCIA SOBRE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE LA RADIACIÓN TOTAL EN EL AGUA

La radiación Röntgen total, que atraviesa en un haz ancho cualquier cuerpo absorbente, por ejemplo el agua, está formada por dos componentes ondulatorios, la radiación directa del foco del tubo Röntgen y la radiación difusa que se forma en el cuerpo atravesado. Anteriormente se aceptaba que la calidad de los rayos difusos era la misma que la de los rayos directos; pero los trabajos teóricos de Compton y Debye, sobre los electrones de rebote, han demostrado que, probablemente, tiene que existir en el fenómeno de la difusión de los rayos Röntgen un cambio de la longitud de onda primaria hacia el lado blando del espectro. El efecto Compton fué confirmado después por varios experimentadores, y en la bibliografía se encuentran algunos trabajos que tratan del estudio del fenómeno de la difusión, pero no del efecto de esta última sobre la calidad de la radiación total. Como tampoco existen hasta hoy trabajos que den, en sentido cuantitativo, algo definitivo sobre el efecto Compton, creyó oportuno el autor hacer varias series de mediciones para tener una idea sobre la magnitud del cambio de la longitud efectiva de un haz primario dado, atravesando el agua, tanto en la repartición cuantitativa como en la cualitativa.

OBSERVACIONES PRELIMINARES

Un rayo X de la frecuencia ν y de la longitud de onda $\frac{c}{\nu} = \lambda$, donde c es la velocidad constante de la luz, encuentra en su camino a través de cualquier substancia, un electrón situado, por ejemplo, en la periferia de

un átomo. Este electrón absorbe toda la energía del rayo primario, y según la teoría de Compton y Debye esta energía recibida se divide en dos partes, variables dentro de ciertos límites. Una parte se convierte en una cierta cantidad de fuerza viva, de manera que el electrón, gracias a que es atraído débilmente por el átomo, puede hacer un cierto camino dentro de la substancia absorbente, y es capaz de producir los mismos efectos que ha producido el electrón primario. La otra parte de la energía es emitida en forma ondulatoria, y es lo que se llama «rayo difuso». Este último es capaz de producir una nueva separación de un electrón de su átomo, si la energía es todavía suficiente, de manera que el mismo fenómeno puede repetirse varias veces. Distinguimos, entonces, electrones primarios, secundarios, etc., que son todos capaces de producir rayos difusos de una infinidad de longitudes de onda.

La formación de un rayo difuso y el desplazamiento del electrón emisor son dos fenómenos que aparecen al mismo tiempo y que están ligados el uno con el otro por relaciones definidas. Anteriormente, se creía que los rayos difusos se repartían uniformemente alrededor del electrón emisor, pero hoy, por los estudios teóricos de Compton y Debye y por algunos trabajos experimentales, sabemos que el rayo difuso sale del electrón emisor solamente en *una dirección*. Einstein ha dado a esta clase de rayos el nombre de «rayos en aguja». La dureza de este rayo difuso depende de la dirección en la cual sale de su electrón, o lo que es lo mismo, *la longitud de onda del rayo difuso depende del ángulo que forma su dirección con la dirección del rayo primario (excitante)*. Con este ángulo queda también determinada la dirección en la cual se mueve el electrón emisor. Como esta última dirección es, hasta cierto punto, contraria a la del rayo difuso emitido, se llama a este electrón «electrón de rebote».

Ahora bien, como la suma de la energía viva del electrón y del rayo emitido por el mismo es igual a la energía total del rayo excitante, la energía del rayo difuso tiene que ser menor que la del rayo excitante, es decir, el rayo difuso siempre tiene que ser más blando. Solamente en una dirección de emisión de un rayo difuso no hay cambio de la longitud de onda, y ésta es la del rayo excitante mismo. En este caso la energía viva tiene que ser 0, porque la suma de las dos energías nunca puede ser mayor que la del rayo excitante.

La figura 1 explica estos fenómenos.

Un rayo monocromático (homogéneo) entra en la dirección p en cualquier substancia absorbente y encuentra en su camino un electrón e . La energía de este rayo es $h\nu_1$. Las flechas en la parte superior de la direc-

ción p determinan en sus terminales una curva que da con sus distancias al electrón e , la energía de todos los rayos difusos posibles. Las flechas debajo del rayo incidente p determinan con sus terminales otra curva, la cual da con sus distancias al electrón e , la energía del electrón de rebote. Como ya lo hemos dicho, sale el rayo difuso solamente en una dirección determinada del electrón. Con esta dirección está fijada la energía. Podemos decir, entonces, que las flechas no dan solamente el poder de la energía, sino también la dirección en la cual sale aquélla del electrón e . La misma consideración es aplicable a los electrones de rebote.

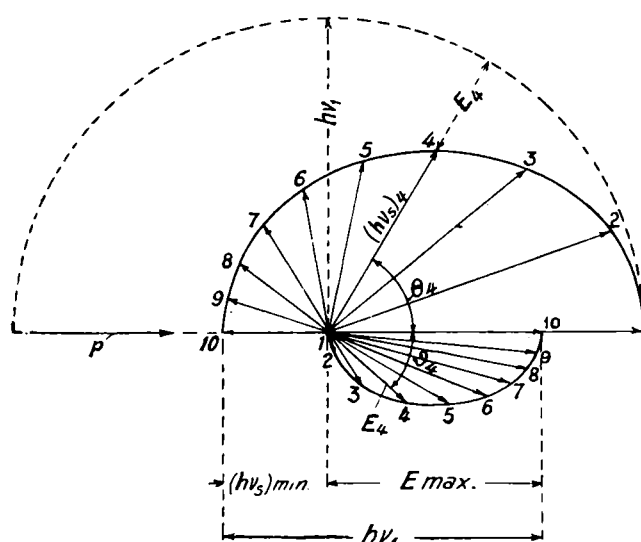


Figura 1

Aceptemos que un rayo difuso salga del electrón e en la dirección 4 (por encima de la dirección del rayo incidente). El largo de la flecha $(h\nu_s)_4$ da la energía parcial del rayo excitante. El resto de la energía, que está dado por la diferencia entre la energía del rayo excitante $(h\nu)_1$ y la del rayo difuso $(h\nu_s)_4$, es E_4 , vale decir la energía del electrón de rebote que sale en la dirección 4 (debajo del rayo incidente p). Hay dos casos límites que están dados por la dirección 1 y 10 del rayo difuso. Si el rayo difuso forma el ángulo 0 grados con el rayo incidente, no hay ninguna pérdida en la penetrabilidad, de manera que no queda nada para el movimiento del electrón emite; entonces el largo de la flecha que marca el movimiento del electrón de rebote es 0. Cuando el rayo difuso forma un ángulo de 180 grados con el rayo incidente, existe el mayor cambio de la longitud de onda entre el rayo incidente y el rayo difuso. Es decir, que la energía del rayo difuso tiene que ser muy pequeña, el rayo tiene

que ser muy blando, y el resto de la energía excitante tiene su valor máximo. El electrón de rebote va en la dirección del rayo incidente y el rayo difuso en sentido contrario de esta dirección (las flechas 10 en la figura 1).

La expresión matemática de estos fenómenos está dada por la fórmula siguiente :

$$d\lambda\theta = 0,0484 \operatorname{sen}^2 \frac{\theta}{2}.$$

En esta fórmula $d\lambda\theta$ es el cambio en la longitud de onda o la diferencia entre la energía del rayo primario, excitante, y el rayo difuso, emitido con el ángulo θ con respecto a la dirección del rayo primario. Es interesante establecer que el cambio de la longitud de onda no depende ni de la naturaleza del cuerpo difuso ni de la longitud del rayo excitante.

Consideremos nuevamente nuestros dos casos límites :

1° Si el ángulo $\theta = 0^\circ$; el segundo miembro de la ecuación será 0 y no hay ningún cambio en la longitud. La energía del electrón de rebote es 0, como ya fué mencionado más arriba;

2° Si el ángulo $\theta = 180^\circ$, resulta para el cambio de la longitud 0,0484 U. A.

Este cambio de 0,0484 U. A. tiene poca influencia sobre ondas primarias relativamente largas. Pero la influencia sobre ondas cortas puede ser de gran importancia. Daremos algunos datos interesantes :

Por el fenómeno de la difusión será la longitud de onda de 0,2618 U. A. en el agua como difusor, por ejemplo, si está atravesada por un haz homogéneo de 0,2134 U. A. (longitud más larga del tungsteno de la serie K), es decir, la longitud resultante es un 22 por ciento más larga.

La longitud más corta que se encuentra en un haz, producido por una tensión de 176,3 kilovoltios, es de 0,07 U. A. La longitud difusa que va en sentido contrario de la onda incidente tiene una longitud de 0,1184 U. A., lo que es un 69 por ciento mayor.

Uno de los componentes más duros de los rayos γ del radium tiene la longitud de 0,022 U. A. La longitud difusa más larga tiene entonces el largo de 0,0704 U. A., lo que es ya un 220 por ciento de la longitud incidente.

La longitud efectiva de un haz frecuentemente usado en la práctica es de 0,1545 U. A. La longitud más larga que encuentra la superficie del agua es de 0,2029 U. A., o sea un 31,3 por ciento más grande que la longitud efectiva del haz primario.

Estos ejemplos muestran claramente la influencia enorme de los rayos

difusos sobre la calidad de la radiación total, de manera que consideramos necesario saber algo más definitivo sobre la composición de la radiación total.

EXPERIMENTOS PRELIMINARES

La calidad de un haz de rayos está dada por el coeficiente de extinción en cualquier substancia o también por la longitud efectiva. Duane ha descrito en el *American Journal of Radiology* un método para la determinación de la longitud efectiva de un haz, midiendo las dos intensidades, que resultan antes y después del pasaje a través de 1 milímetro de cobre. Para eso divide un haz de rayos heterogéneos en sus varios componentes y determina, para cada componente, el porcentaje de su energía, que es capaz de atravesar 1 milímetro de cobre. La figura 2 muestra las varias longitudes en relación al porcentaje que pasa por el cobre. Si en sentido inverso, determinamos el porcentaje de cualquier haz de rayos, de varias longitudes de onda, que logran atravesar 1 milímetro de cobre, podemos determinar, con la curva dada en la figura 2, la longitud « efectiva », es decir, una longitud homogénea que dará, con la magnitud correspondiente, el mismo efecto físico que el haz heterogéneo usado en realidad.

En las experiencias fué usado este método de Duane. Para la medición de las diversas intensidades se usó el método ionizante, utilizando el dosímetro de Siemens. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes :

- 1ª Tensión en el tubo, medida espectrográficamente : 176,3 kilovoltios ;
- 2ª Miliamperaje usado : 5 y 20 miliamperios ;
- 3ª Tubos : Un tubo norteamericano para 200 kilovoltios y 8 miliamperios y otro de 200 kilovoltios y 50 miliamperios ;
- 4ª Focos : Había que determinar la superficie de los focos de los tubos

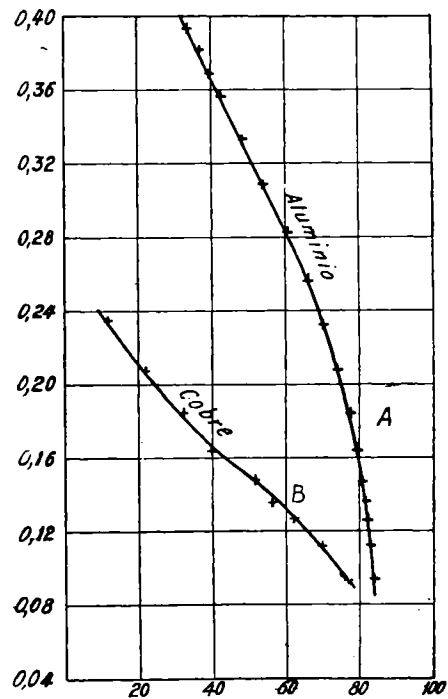


Figura 2. — Las longitudes de ondas medidas en U. A., en relación al porcentaje de la energía que pasa por 1 milímetro de cobre.

usados, por la influencia de la penumbra sobre la ionización en la cámara. Las fotografías de estos focos se ven en la figura 3;

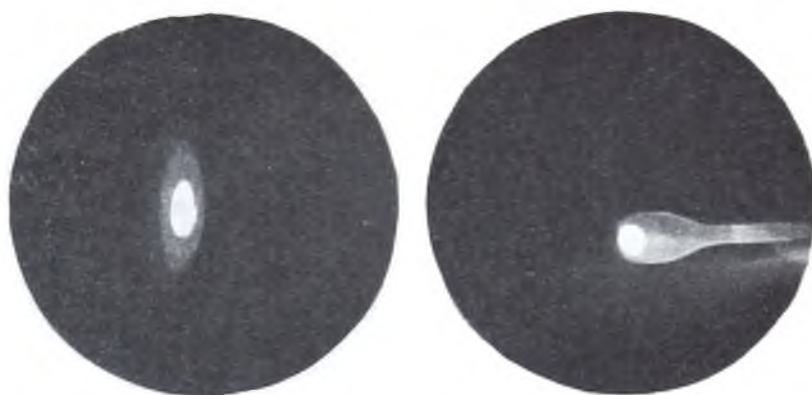


Figura 3

5ª Filtros : Usamos varios filtros en los experimentos preliminares : como : 0,5 milímetros de cobre, 1,0 milímetros de cobre y 0,2 milímetros de oro. En los experimentos generales usamos solamente el filtro de 0,5 milímetros de cobre ;

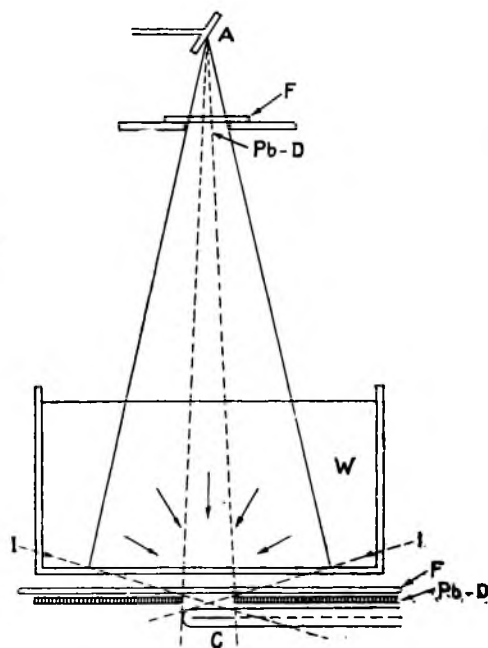


Figura 4

6ª Calidad de los rayos usados : El coeficiente de extinción de la mezcla, dada por la tensión y el filtro, fué determinado con un electroscoipo y resultó : 0,1846. La longitud efectiva, según el método de Duane, para los varios filtros se puede ver en la tabla I, en la tercera columna. Usando 0,5 milímetros de cobre como filtro, resultó como longitud efectiva 0,1555 U. A. ;

7ª Distancia focal : 50 centímetros en todos los casos ;

8ª Campos de entrada : Variables (véase los datos en la descripción de los experimentos generales).

La figura 4 da el dispositivo para los ensayos preliminares. A es el anticátodo del tubo de rayos de donde sale el haz heterogéneo de rayos Röntgen. Este haz tiene que pasar por un filtro F, que deja pasar sola-

mente los rayos duros y que produce lo que se llama « homogeneidad práctica ». Pb-D es un diafragma de plomo que determina el campo de entrada de la radiación sobre la superficie del agua. Este diafragma está calculado de tal manera, que el diámetro del campo entrante era de 17 centímetros (50 cm de distancia focal). W es el agua que se encontraba en una caja de celuloide; el espesor del agua fué variable, oxilando entre 5 y 10 centímetros. En estos espesores está incluido el espesor de la pared de celuloide, que absorbe con este espesor y con esta calidad de rayos, lo mismo que el agua. F es el filtro de cobre de 1 milímetro de espesor, que fué usado según el método de Duane. Pb-D es otro diafragma de plomo y C la cámara de ionización del dosímetro Siemens. La corriente pequeña de ionización, producida por los rayos, se mide por la pérdida de tensión en una resistencia muy grande. Como esta resistencia depende de la temperatura, hay que contrastarla siempre antes y después de una serie de mediciones. Esta contrastación se hizo por medio de una corriente de ionización constante de $2,06 \cdot 10^{-10}$ amperios, producida por un preparado constante de óxido de uranio. Esta sal está colocada en un condensador, que completa el equipo del dosímetro Siemens. El valor de la resistencia para cada serie de mediciones se encuentra en cada una de las tablas.

Las experiencias preliminares fueron hechas midiendo, en las condiciones ya indicadas, las intensidades que existen en la cámara de ionización, con o sin presencia del filtro de 1 milímetro de cobre. Con estas dos intensidades se calcula el porcentaje de la radiación que pasa todavía a través de este filtro, y por medio de la figura 2 se encuentra la longitud efectiva. La tabla I da los resultados respectivos.

. TABLA I

Resultados de las experiencias preliminares que muestran el cambio de la longitud efectiva por la influencia de los rayos difusos

Tensión en el tubo en kilovoltios	Filtro en milímetros	Longitud de onda efectiva de la mezcla de rayos en U. A.		
		Sin presencia de agua	Con 5 centímetros de agua	Con 10 centímetros de agua
176,3	0,5 Cu	0,1545	0,1680	0,1700
176,3	1,0 Cu	0,1430	0,1480	0,1510
176,3	0,2 Au	0,1535	0,1650	0,1680

De esta tabla se deduce, indudablemente, que existe una disminución de la energía efectiva, aumentándose la longitud efectiva por la influencia de los rayos difusos. Este aumento en la longitud efectiva parece depender de la cantidad de agua atravesada por los rayos primarios o, lo que es lo mismo, *la calidad de la radiación total (directa y difusa) depende del volumen atravesado*. En el dispositivo dado por la figura 4 se mide solamente la influencia de los rayos difusos que van en la misma dirección que el haz primario. Como ya se mencionó en la introducción

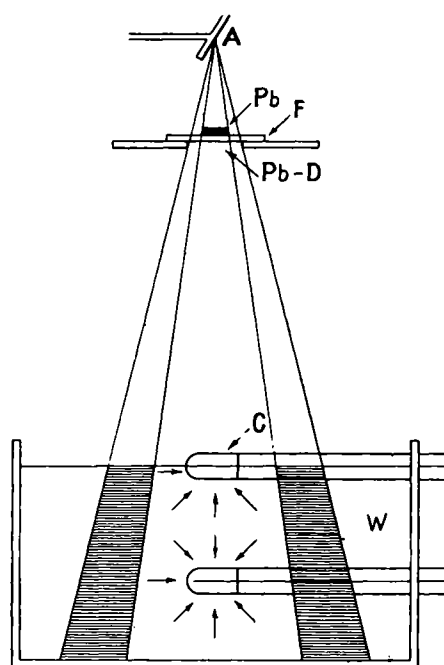


Figura 5

de este trabajo, se encuentra la mayor influencia de los rayos difusos sobre los primarios, hacia el sentido contrario del haz excitante. Se puede esperar, por esta razón, una aun mayor disminución de la energía efectiva, si se efectúa la medición poniendo la cámara de ionización dentro del agua. Pero con este dispositivo de experimentación no se puede realizar esta medición dentro del agua, porque el filtro de cobre no deja pasar los rayos directos y cambiarían de esta manera todas las relaciones en el agua, debajo de la cámara de ionización. Además, hay que pensar que una gran parte de los rayos difusos no pasa ya perpendicularmente a través del filtro de 1 milímetro de cobre, usando el dispositivo de la figura 4. (Véase el rayo I.) Se deduce, entonces, de este fenómeno, que el camino que tienen que recorrer los rayos difusos en el cobre aumenta con el ángulo que forma la dirección del rayo difuso con el rayo central; y con el mayor camino aumenta la debilitación. Una gran parte de los rayos difusos parecen, entonces, más blandos de lo que en realidad son, de manera que la longitud efectiva de la radiación total parece más blanda de lo que debía ser. De esta manera hay una cierta compensación para los rayos no medidos, que vienen en sentido contrario de los rayos primarios. Para estudiar definitivamente estas relaciones, fué cambiado el dispositivo de experimentación, según lo indica la figura 5.

Esta figura corresponde, más o menos, a la figura 4, solamente que se encuentra encima del filtro, que sirve para la producción de la homoge-

neidad de la radiación. Se puede esperar, por esta razón, una aun mayor disminución de la energía efectiva, si se efectúa la medición poniendo la cámara de ionización dentro del agua. Pero con este dispositivo de experimentación no se puede realizar esta medición dentro del agua, porque el filtro de cobre no deja pasar los rayos directos y cambiarían de esta manera todas las relaciones en el agua, debajo de la cámara de ionización. Además, hay que pensar que una gran parte de los rayos difusos no pasa ya perpendicularmente a través del filtro de 1 milímetro de cobre, usando el dispositivo de la

neidad práctica, un trozo redondo de plomo colocado de tal manera que los rayos formen en el agua una pirámide hueca. El diámetro de este plomo es variable, para poder variar el volumen atravesado por rayos directos. La cámara se encuentra en el recipiente del agua y es movable en la dirección del rayo central. La cámara es atravesada solamente por los rayos difusos que salen en una infinidad de direcciones del volumen de agua encontrado por los rayos primarios.

Como el estudio de la calidad de los rayos difusos consiste en la medición de dos intensidades, antes y después del pasaje por un filtro de medición, hemos usado este método de experimentación para un control de la cantidad de los rayos difusos bajo ciertas condiciones. El método indicado para la medición directa de la cantidad de los rayos difusos fué ya descrito por Borell en la *Strahlentherapie*, para mediciones por medio de películas fotográficas. Pero como el método fotográfico produce siempre una gran cantidad de errores, desechamos este método y lo reemplazamos por el de la ionización, que es más exacto, independiente de una gran cantidad de factores, no despreciables en la fotografía, y que permite hacer con el mayor grado de exactitud una serie de mediciones en un tiempo relativamente corto. Los resultados de estos trabajos mostraron que la longitud efectiva de la radiación total en el agua (directa y difusa) se cambia de tal manera, que no es posible hacer una contrastación de los ennegrecimientos recibidos dentro del agua, por medio de una escala normal hecha con los rayos directos solamente (¹). Es seguro que la discrepancia entre los resultados de la escuela de Dessauer y otros autores, como Holfelder, por ejemplo, es motivada en gran parte por estos fenómenos.

EXPERIENCIAS GENERALES

a) Determinación de los rayos difusos en sentido cuantitativo

Cuando un haz muy fino de rayos entra en un cuerpo absorbente, en el agua, por ejemplo, su intensidad disminuye por tres razones :

- 1ª Por la ley del cuadrado de la distancia ;
- 2ª Por la absorción ;
- 3ª Por la difusión.

Existe una fórmula matemática que permite calcular la intensidad a cualquier profundidad del agua dentro del rayo central, si la intensidad

(¹) Comparar las mediciones de la escuela de Dessauer en sus varias publicaciones en *Strahlentherapie* y *Physikalische Zeitschrift*.

antes de la entrada de los rayos en el cuerpo absorbente y el coeficiente de extinción están dados. Sea I_0 esta última intensidad e I_x la intensidad a una profundidad de d centímetros de la superficie del agua; sea e la base de los logaritmos naturales y μ el coeficiente de extinción, formado por el coeficiente de absorción pura y el coeficiente de difusión $\mu = \alpha + \tau$. r_0 y r_x sean las distancias respectivas de estos puntos al foco del tubo, en los cuales existen las intensidades I_0 e I_x . Basados en estas denominaciones tenemos la ecuación:

$$I_x = I_0 e^{-\mu d \frac{r_0^2}{r_x^2}}.$$

En los experimentos generales se usaba una tensión dada en el tubo de 176,3 kilovoltios y solamente un filtro de 0,5 milímetros de cobre. El coeficiente de extinción de la mezcla de rayos, producida por tensión y filtro indicados, es de 0,1846 en el agua. La longitud efectiva de la misma mezcla fuera del agua es de 0,1545 U. A.

La intensidad de los rayos antes de entrar en el agua fué medida por medio de la corriente de ionización con $9,6 \cdot 10^{-10}$ amperios, cuando la distancia foco-agua era de 50 centímetros. La tabla II, columna B, da los valores calculados con la ecuación indicada, y la curva B de la figura 7 da el mismo resultado en forma gráfica. El control experimental de estos resultados, efectuado con un haz muy fino y un pequeño espesor de agua, da una buena concordancia. Pero si el volumen atravesado aumenta un poco, existe pronto una discrepancia notable entre las mediciones experimentales y los cálculos, causada por la influencia de los rayos difusos que van de los varios puntos del volumen, encontrado por rayos directos, hacia el rayo central, y de este último hacia las partes periféricas del volumen atravesado. La intensidad en cualquier parte del volumen irradiado aumentará por la influencia de los rayos difusos, y este aumento será tanto mayor cuanto mayor es la cantidad de puntos por donde salen los rayos difusos, es decir, cuando mayor es el volumen irradiado. Friedrich fué el primero que describió estos fenómenos, y la escuela de Dessauer fué la primera que estudió bien las leyes que determinan la repartición de la energía en el agua, con relación a las varias calidades de rayos y del volumen encontrado por los rayos. Varios autores, como Glocker, Holfelder y otros más, encontraron después, con métodos más perfeccionados, otros valores para la repartición de los rayos difusos, sobre todo en las partes del agua alrededor de la pirámide de radiación. Pero en ninguno de estos trabajos fué medida la radiación difusa en forma directa. En la descripción de la figura 5 fué mencionado un trozo de plomo que no permite

que los rayos directos encuentren la cámara. Por la variación del diámetro de este plomo existe la posibilidad de variar el volumen no irradiado alrededor del rayo central, y el plomo puede ser tomado tan pequeño que el espacio libre de rayos directos cubra justamente la cámara de ionización. Si se mide en cada profundidad del agua, dentro del rayo central, las varias intensidades en relación al volumen no encontrado por rayos directos, obtendremos una serie de curvas que pueden ser prolongadas hasta los puntos que corresponden al volumen cero no encontrado directamente. Estos valores tienen que corresponder exactamente con las diferencias entre los valores calculados por la ecuación ya mencionada y los valores encontrados sin la presencia del trozo de plomo de la figura 5. Estos últimos valores se encuentran en la columna C de la tabla II, y la curva C de la figura 7 da el gráfico correspondiente. Se puede ver que con la calidad de los rayos usados y la magnitud del campo entrante, los valores de la curva C son sumamente altos en relación a los calculados de la curva B. Las diferencias entre los valores de las columnas B y C son los valores de los rayos difusos solamente. La columna D de la tabla II y el gráfico D de la figura 7, muestran cómo se aumenta rápidamente en los primeros centímetros el valor absoluto de la radiación difusa, para disminuirse después lentamente con el aumento de la profundidad. Calculando los valores de la columna D como porcentaje de los valores de la columna C, es decir, la radiación difusa absoluta como porcentaje de las radiaciones totales en iguales profundidades, resultan los valores de la columna E y el gráfico E de la figura 7, lo que muestra que la influencia de los rayos difusos aumenta con la profundidad en el agua. Varios autores habían encontrado para el recorrido de esta curva E una línea recta. Pero como la curva C muestra un máximo bien definido por la influencia de los rayos difusos, más o menos a 1 centímetro de profundidad, resulta para el recorrido de la curva E también un aumento más rápido en los primeros centímetros. La curva es en su última parte más deprimida, pero no muestra el carácter de una línea recta. *Se puede concluir que la radiación difusa no aumenta proporcionalmente con la profundidad en el agua sino según una ley exponencial.*

Para ver si la influencia de los rayos difusos se puede calcular formando las diferencias entre los valores medidos y calculados, fué elegido el método ya descrito, y en las siguientes tablas están dados los valores respectivos para los varios volúmenes no encontrados por rayos directos.

Antes hay que mencionar dos fenómenos que son capaces de hacer variar un poco los resultados absolutos.

1° La cámara de ionización usada tiene un efecto de dirección. Es

decir, una cierta cantidad de una cierta calidad de rayos va a producir más efecto ionizante, atravesando la cámara en la dirección de su eje mayor, que atravesándola en la dirección perpendicular a la primera. Por esta razón se mide la influencia de los rayos difusos que vienen en dirección horizontal hacia el rayo central, en más de lo que son en realidad. Pero el soporte de la cámara de ionización no deja entrar en un lado los rayos difusos horizontales en la cámara de ionización, de manera que en este último lado se miden en menos los rayos horizontales respecto a su cantidad. Resulta, entonces, que los dos efectos están más o menos en equilibrio, y probablemente hay poca influencia en el efecto de la dirección de la cámara. Además, existe este mismo error también



Figura 6

en la medición directa de la suma de las dos radiaciones, de manera que este fenómeno no tendrá ninguna influencia sobre nuestro resultado. Es claro que no se dice que la cantidad absoluta de los rayos difusos no cambiará un poco por esta característica de la cámara de ionización, pero respecto a la finalidad de este trabajo podemos admitir que no ejerce ninguna influencia;

2° El grado máximo de la radiación difusa en los primeros centímetros en el agua, cambia con la posición de la cámara de ionización en la superficie del agua. Se eligió para este trabajo, como muestra también la figura 5, la posición de tal manera, que la mitad de la cámara de ionización se encontraba en el aire y la otra mitad en el agua. Poniendo la cámara completamente en el aire, el máximo, causado por los rayos difusos, aumenta todavía, de manera que el principio de la curva E muestra mayor inclinación con respecto al eje horizontal del sistema de coordenadas, sin llegar después a un recorrido recto. Poniendo la cámara completamente en el agua, no hay más máximo en el recorrido de la curva C; el principio de la curva E será entonces más deprimido, pero tampoco en esta posición de la cámara resulta el recorrido de la curva E recto, lo que muestra también que la radiación difusa no aumenta proporcionalmente con la profundidad, como lo sostuvieron otros autores (Friedrich y Glocker), sino según una ley exponencial. La figura 6 da una tele-radiografía de la cámara de ionización. Se da esta figura porque las dimensiones de la cámara determinan las dimensiones del campo en la superficie del agua, formando la pirámide no encontrada por rayos directos. Van a continuación las tablas que contienen los resultados de las experiencias.

TABLA II

A	B	C	D	E
0 cm	$9 \cdot 10 \cdot 10^{-10}$ amp.	$14,3 \cdot 10^{-10}$ amp.	$4,7 \cdot 10^{-10}$ amp.	32,8
1	7,70	14,5	6,8	47,0
2	6,15	13,3	7,2	53,8
4	3,94	11,1	7,2	64,5
6	2,52	9,0	6,5	72,0
8	1,63	7,0	5,3	76,6
10	1,06	5,2	4,2	80,0
12	0,68	4,1	3,4	83,5

La columna A contiene las profundidades en el agua en centímetros; la columna B, los valores calculados según la fórmula indicada; la

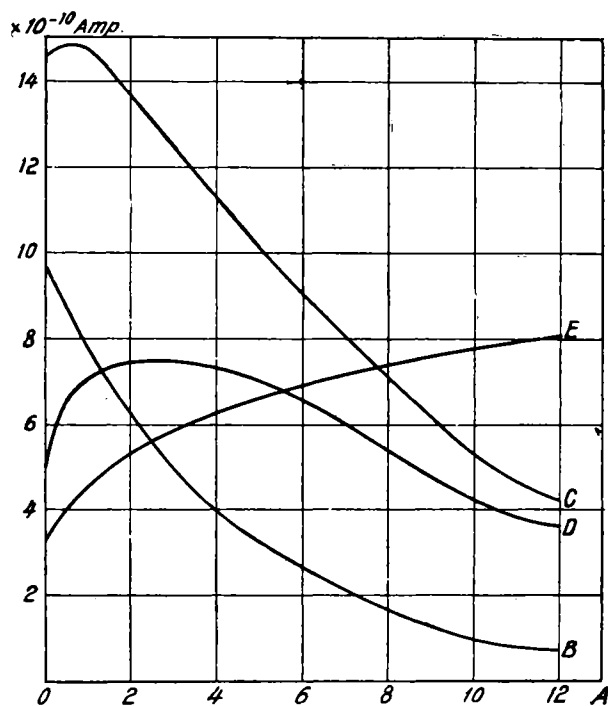


Figura 7

columna C, los valores medidos para un volumen de 5912 centímetros cúbicos; las diferencias de los valores de las columnas B y C son los valores de la radiación difusa y se encuentran en la columna D; y, finalmente, la columna E contiene los valores de la columna D expresados en tanto por ciento de los valores de la columna C.

Las tablas siguientes indican los resultados usando un campo entrante de rayos de 17 centímetros de diámetro. El volumen total, sin la presencia del trozo de plomo, era de 5912 centímetros cúbicos. Los volúmenes no encontrados por los rayos directos, usando varios trozos de plomo, eran de 947,5, 1792, 2993 y 4329 centímetros cúbicos. Cada tabla lleva la resistencia del dosímetro de Siemens, determinada antes y después de cada serie de medidas.

TABLA III

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 947,5 centímetros cúbicos

Resistencia : $5,6 \cdot 10^{10}$ ohmios

Profundidad en el agua	Corriente de ionización producida por rayos difusos	Logaritmos de los valores anteriores
0 cm	$4,04 \cdot 10^{-10}$ amp.	0,606
2	4,85	0,686
4	4,85	0,686
6	4,43	0,646
8	3,78	0,577
10	3,05	0,484
12	2,93	0,467

TABLA IV

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 1792 centímetros cúbicos

Resistencia : $5,6 \cdot 10^{10}$ ohmios

Profundidad en el agua	Corriente de ionización producida por rayos difusos	Logaritmos de los valores anteriores
0 cm	$2,78 \cdot 10^{-10}$ amp.	0,444
2	3,10	0,491
4	3,10	0,491
6	2,85	0,455
8	2,53	0,403
10	2,10	0,322
12	1,64	0,215

TABLA V

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 2993 centímetros cúbicos

Resistencia : $5,6 \cdot 10^{10}$ ohmios

Profundidad en el agua	Corriente de ionización producida por rayos difusos	Logaritmos de los valores anteriores
0 cm	$1,16 \cdot 10^{-10}$ amp.	0,064
2	1,28	0,107
4	1,28	0,107
6	1,16	0,064
8	1,04	0,017
10	0,85	—0,071
12	0,66	—0,180

TABLA VI

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 4329 centímetros cúbicos

Resistencia : $6,0 \cdot 10^{10}$ ohmios

Profundidad en el agua	Corriente de ionización producida por rayos difusos	Logaritmos de los valores anteriores
0 cm	$0,490 \cdot 10^{-10}$ amp.	—0,310
2	0,570	—0,244
4	0,570	—0,244
6	0,490	—0,310
8	0,440	—0,357
10	0,380	—0,420
12	0,320	—0,495

La figura 8 muestra dos grupos de curvas. Por el momento nos interesan solamente las curvas de trazo continuo. En el eje de las ordenadas se colocan los valores de la columna D de la tabla II; es decir, las cantidades de rayos difusos calculadas para el volumen cero no encontrados por rayos directos. Las flechas en el eje de las abscisas marcan los volúmenes indicados en cada una de las tablas III, IV, V y VI, es decir, que dan los volúmenes, no encontrados por rayos directos, con los cuales fueron hechas las mediciones. Por los puntos observados se determinan las curvas dibujadas y se puede ver claramente que estas

curvas encuentran justamente en los puntos marcados anteriormente al eje de las ordenadas, es decir, en los puntos calculados, obtenidos en la tabla II, columna B, por medio de la ecuación indicada. Resulta, por consiguiente, una buena concordancia entre la teoría y las experiencias.

También se puede hacer el gráfico tomando sobre el eje de las ordenadas, no ya los valores de las corrientes de ionización, sino los logaritmos de estos valores. Resulta así la figura 9.

Las curvas, dibujadas en trazo continuo, muestran, desde el punto

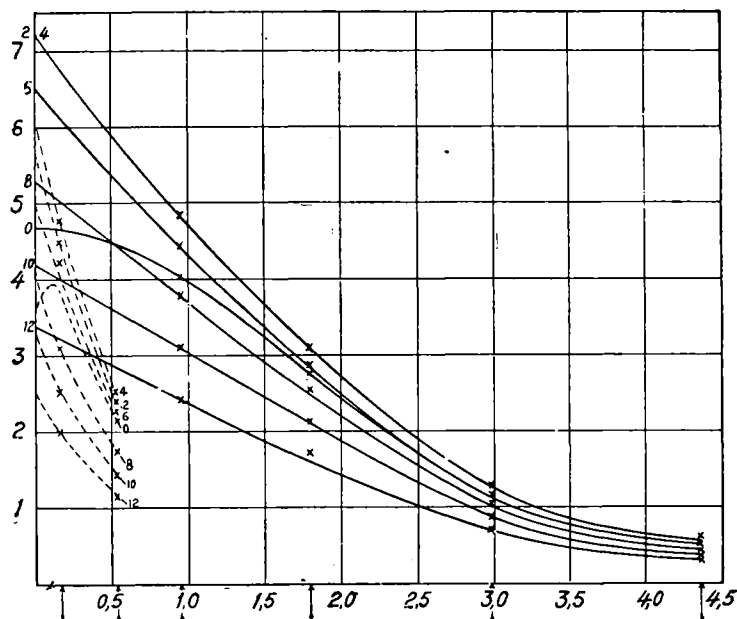


Figura 8

correspondiente a 1 litro de volumen no encontrado por rayos directos, un recorrido recto, lo que indica que el aumento de la intensidad de los rayos difusos en el rayo central sigue en el dispositivo de experimentación una ley exponencial. Que las curvas no son rectas, en el principio de su recorrido, depende de varios factores :

1° De la posición de la cámara de ionización en la superficie del agua. Aceptemos como posición normal de la cámara la que resulta cuando ella se encuentra completamente en el agua. Como ya se mencionó, no existe entonces el máximo a la profundidad de 1 centímetro más o menos, pero por la mayor influencia de los rayos difusos sobre la ionización, aumentará el valor medido en la superficie y con él también el valor del logaritmo. Este aumento sigue hasta una profundidad de 1,5 centímetros

más o menos, y desde ahí todos los valores se encuentran más bajos que los valores indicados en las varias tablas, dado que la cámara se encontraba, durante la experimentación, mitad en el aire y mitad en el agua. Es decir, los valores de las curvas cerca del eje de las coordenadas para los primeros centímetros serían más altos y los otros más bajos, de manera que resultará, probablemente, una línea recta;

2° Por la falta de rayos difusos en la superficie del agua, que van en la dirección del haz primario, porque la difusión en el aire es prácticamente cero. La influencia de esta falta es apreciable, por lo menos, hasta 3 ó 4 centímetros de profundidad.

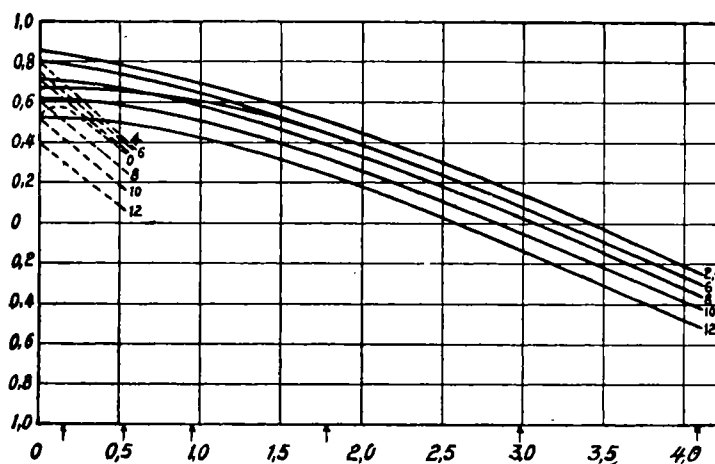


Figura 9

En las figuras 8 y 9 se encuentran además de las curvas dibujadas con trazo continuo, otras punteadas. Estas curvas corresponden a otra serie de mediciones, con un diafragma de plomo (Pb-D) más pequeño que el usado anteriormente. El campo entrante en la superficie del agua era de 13 centímetros de diámetro. Las tablas siguientes corresponden al volumen más pequeño, encontrado por rayos directos, y fueron hallados de la misma manera que en las tablas anteriores. Los valores de la columna B de la tabla VII corresponden exactamente a los valores de la columna B de la tabla II, porque la radiación difusa no tiene ninguna influencia sobre ellos. El diafragma de plomo tenía un diámetro de 3,6 centímetros.

TABLA VII

A	B	C	D	E
0 cm	$9,60 \cdot 10^{-10}$ amp.	$13,20 \cdot 10^{-10}$ amp.	$3,60 \cdot 10^{-10}$ amp.	27,3
1	7,70	13,32	5,62	42,2
2	6,15	11,84	5,69	48,0
4	3,94	10,04	6,10	60,6
6	2,52	7,92	5,40	68,2
8	1,63	5,60	3,97	71,0
10	1,06	4,44	3,38	76,1
12	0,68	3,18	2,50	78,6

La columna A contiene las profundidades en el agua en centímetros; la columna B, los valores calculados según la fórmula indicada; la columna C, los valores medidos para un volumen de 2840 centímetros cúbicos; las diferencias de los valores de las columnas B y C son los valores para la radiación difusa y se encuentran en la columna D; la columna E, finalmente, contiene los valores de la columna D en tanto por ciento de los valores de la columna C.

Estas tablas muestran los resultados usando un campo entrante de rayos de 13 centímetros de diámetro. El volumen total, sin la presencia del trozo de plomo, era de 2840 centímetros cúbicos. Los volúmenes no encontrados por rayos directos, usando varios trozos de plomo, eran de 160 y de 525 centímetros cúbicos. Cada tabla lleva la resistencia del dosímetro de Siemens, determinada antes y después de cada serie de medidas.

TABLA VIII

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 160 centímetros cúbicos

Resistencia : $6,62 \cdot 10^{10}$ ohmios

Profundidad en el agua	Corriente de ionización producida por rayos difusos	Logaritmos de los valores anteriores
0 cm	$3,85 \cdot 10^{-10}$ amp.	0,585
2	4,50	0,653
4	4,70	0,672
6	4,15	0,618
8	3,14	0,497
10	2,58	0,412
12	2,02	0,305

TABLA IX

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 525 centímetros cúbicos

Resistencia : $6,83 \cdot 10^{10}$ ohmios

Profundidad en el agua	Corriente de ionización producida por rayos difusos	Logaritmos de los valores anteriores
0 cm	$2,20 \cdot 10^{-10}$ amp.	0,342
2	2,42	0,384
4	2,55	0,407
6	2,30	0,362
8	1,80	0,255
10	1,45	0,161
12	1,18	0,072

Las curvas de la primera serie de mediciones muestran que los recorridos para las profundidades de 0 y 6 centímetros son, en parte, idénticos,

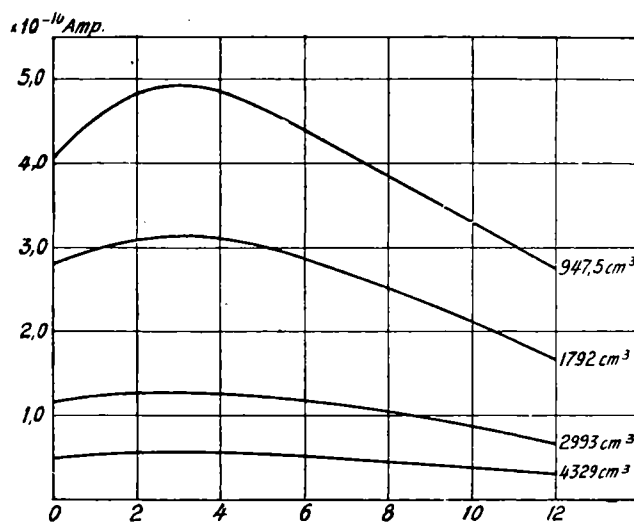


Figura 10

tivos, y para las profundidades de 2 ó 4 centímetros coinciden en toda su longitud. En la nueva serie de mediciones aparecen todas las curvas separadas. La primera parte de la curva para la profundidad de 0 centímetros está más curvada que la misma parte de la curva correspondiente a la primera serie de mediciones. El máximo de la intensidad a 1 centímetro de profundidad, más o menos, no es tan fuerte como el mismo máximo de la pirámide grande de radiación. Con estas mediciones se

demuestra que el máximo existe verdaderamente, que es producido por los rayos difusos y que es mayor cuanto mayor es el volumen irradiado.

Los puntos determinados por las mediciones de la segunda serie forman con los puntos calculados de la columna D de la tabla VII, curvas sin ninguna irregularidad, de manera que está demostrado que el valor de la radiación difusa se puede calcular de la manera dada.

La figura 10 da para las relaciones de la primera serie de experiencias la influencia de los rayos difusos en las varias profundidades del agua. Se puede ver que existe un máximo de los rayos difusos sólo a los 3 centímetros de profundidad. Este máximo parece existir más cerca de la superficie del agua cuanto mayor es el volumen no encontrado por rayos directos, y aumenta con la disminución del volumen no encontrado por rayos directos.

La figura 7 muestra en el trazado de la curva C el máximo de la radiación total (directa y difusa) a una profundidad de 1 centímetro solamente. La pérdida de la energía primaria por la ley del cuadrado de la distancia, por la absorción y la difusión, es la causa de que el máximo de los rayos difusos sólo no puede existir a una profundidad de 3 centímetros, cuando se suman la radiación primaria y la difusa. Por estas razones encontramos el máximo de la radiación total ya a 1 centímetro de profundidad.

b) Determinación de la calidad de los rayos difusos

Para usar el método de Duane, mencionado en la introducción de este trabajo, para la determinación de la calidad de los rayos difusos, fué construída una pequeña cámara de cobre de un milímetro de espesor, la cual podía ser puesta encima de la cámara de ionización de marfil. Usando después el mismo dispositivo de experimentación, como lo muestra la figura 5, se puede medir para cada volumen no encontrado por rayos directos y para los dos diafragmas de plomo, la calidad de los rayos difusos en el rayo central que llegan hasta la cámara en sus varias posiciones de profundidad. Para tener, por fin, los tanto por ciento de las varias radiaciones difusas que pasan todavía por 1 milímetro de cobre, se necesitan solamente las mediciones con la cámara de cobre encima de la de marfil, porque todos los otros valores de las intensidades, antes del pasaje por el milímetro de cobre, se conocen por las mediciones ya efectuadas.

Respecto a las experiencias preliminares ya se dijo que una parte de los rayos difusos no atraviesa el filtro perpendicularmente a su superfi-

cic. Este error existe también en las mediciones efectuadas con la cámara de cobre, de manera que la longitud efectiva parece más debilitada de lo que es. Es decir, que la calidad de los rayos difusos que se mide es más blanda de lo que es en realidad. Pero hay un factor más, que produce un pequeño error en la observación de la calidad y, además, un efecto contrario al mencionado recientemente. Las intensidades, sin la presencia del filtro de cobre, fueron medidas un poco bajas a causa de la absorción apreciable de los rayos difusos más blandos por la pared de la cámara de marfil. Como la medición de la calidad consiste en la medición de dos intensidades, tomando la relación entre las dos aumentará el valor de los dos miembros de la relación por los dos efectos mencionados, y se puede ver fácilmente que los efectos de los aumentos de las dos intensidades se anulan parcialmente.

En las tablas siguientes están dados para los diferentes volúmenes no encontrados por rayos directos : en la columna 1 la profundidad de la cámara en centímetros; en la columna 2 el porcentaje de los rayos difusos que pasan por el filtro de cobre de 1 milímetro; la columna 3 contiene las longitudes de ondas correspondientes en unidades Angström; y la columna 4 contiene los logaritmos de los porcentajes de la columna 2. Las resistencias del instrumento de medición (dosímetro de Siemens) son las mismas, ya anotadas en las diferentes tablas de la primera serie de mediciones.

TABLA X

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 947,5 centímetros cúbicos

Profundidad en el agua	Porcentaje pasando por 1 mm de cobre	Longitud efectiva en U. A.	Logaritmo del porcentaje
0 cm	21,0	0,210	1,322
2	19,8	0,214	1,297
4	19,0	0,214	1,297
6	21,0	0,210	1,322
8	21,5	0,209	1,333
10	22,0	0,208	1,343
12	22,4	0,206	1,350

TABLA XI

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 1792 centímetros cúbicos

Profundidad en el agua	Porcentaje pasando por 1 mm de cobre	Longitud efectiva en U. A.	Logaritmo del porcentaje
0 cm	17,8	0,219	1,251
2	16,9	0,220	1,228
4	16,9	0,220	1,228
6	17,8	0,219	1,251
8	18,6	0,217	1,270
10	19,1	0,215	1,281
12	19,6	0,214	1,292

TABLA XII

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 2993 centímetros cúbicos

Profundidad en el agua	Porcentaje pasando por 1 mm de cobre	Longitud efectiva en U. A.	Logaritmo del porcentaje
0 cm	15,6	0,225	1,194
2	14,5	0,228	1,162
4	14,5	0,228	1,162
6	15,6	0,225	1,194
8	16,2	0,222	1,210
10	16,6	0,221	1,220
12	17,2	0,219	1,236

TABLA XIII

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 4329 centímetros cúbicos

Profundidad en el agua	Porcentaje pasando por 1 mm de cobre	Longitud efectiva en U. A.	Logaritmo del porcentaje
0 cm	13,7	0,230	1,137
2	12,9	0,232	1,111
4	12,9	0,232	1,111
6	13,7	0,230	1,137
8	14,5	0,228	1,162
10	15,3	0,225	1,185
12	16,1	0,222	1,207

Antes de pasar a la descripción de los resultados de estas tablas, siguen primero las tablas que corresponden al volumen más pequeño, encontrado por rayos directos y a las dos pirámides, no encontradas por rayos directos.

TABLA XIV

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 160 centímetros cúbicos

Profundidad en el agua	Porcentaje pasando por 1 mm de cobre	Longitud efectiva en U. A.	Logaritmo del porcentaje
0 cm	25.2	0.200	1.402
2	24.6	0.201	1.391
4	24.1	0.202	1.382
6	24.8	0.200	1.394
8	25.6	0.199	1.408
10	26.7	0.196	1.426
12	27.0	0.194	1.432

TABLA XV

Medición con un volumen no encontrado por rayos directos de 525 centímetros cúbicos

Profundidad en el agua	Porcentaje pasando por 1 mm de cobre	Longitud efectiva en U. A.	Logaritmo del porcentaje
0 cm	20.0	0.212	1.301
2	19.2	0.215	1.284
4	18.7	0.216	1.272
6	19.8	0.215	1.297
8	20.8	0.210	1.318
10	21.3	0.209	1.326
12	21.8	0.207	1.338

La figura 11 da gráficamente el resultado de las tablas X hasta XV, y muestra dos series de curvas, que corresponden a los dos diferentes volúmenes encontrados directamente por los rayos. En la serie de las curvas grandes se observa que la calidad de los rayos difusos para las profundidades de 0 y 6 centímetros de una parte, y la de las profundidades de 2 y 4 centímetros por otra, son idénticas, lo que corresponde al mismo fenómeno en las curvas que marcan la cantidad de los rayos difusos. Un resultado muy interesante es, además, que los puntos donde existe la

mayor influencia de los rayos difusos en sentido cuantitativo, tienen la menor calidad. La curva más baja de la figura 8 corresponde a 12 centímetros de profundidad, y la más alta a 2 ó 4 centímetros de profundidad. La figura 11 muestra lo contrario. Podemos deducir de este fenómeno, que cuanto mayor es la influencia de los rayos difusos en sentido cuantitativo (absoluto), tanto menor es la calidad de la radiación difusa. Por esta razón aumenta la calidad de los rayos difusos con la profundidad en el rayo central, disminuyéndose, al mismo tiempo, la cantidad absoluta de ellos. Las curvas pequeñas muestran también estos fenómenos. Todas las curvas están separadas, como le corresponde a la serie punteada de la figura 8. Las curvas de la figura 11 se pueden prolon-

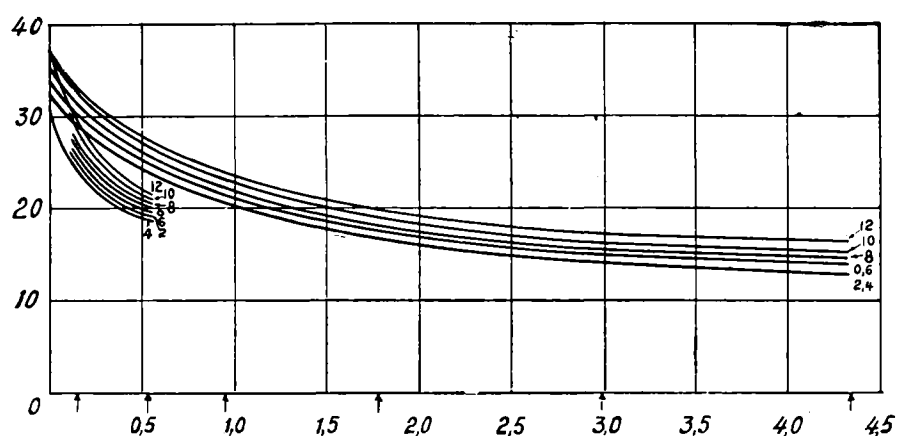


Figura 11

gar fácilmente hasta cortar el eje de las ordenadas, indicando así las calidades de los rayos difusos en el rayo central, cuando el volumen entero es encontrado por los rayos. Antes de dar estos valores en forma de una tabla, vamos a establecer una fórmula que permite calcular la calidad a cualquier profundidad y para cualquier volumen, no encontrado por rayos directos, si en la misma profundidad y para uno de los volúmenes no encontrados, es conocida la calidad de los rayos difusos.

Examinando las tablas X a XV y la figura correspondiente (11), se observa que las calidades para el volumen más pequeño, encontrado por los rayos directos, son mejores que las correspondientes del volumen más grande. Como ya he mencionado, depende esto del fenómeno que cuanto mayor es la cantidad de los rayos difusos, tanto menor es su calidad. Como la cantidad de los rayos difusos depende del volumen irradiado directamente, podemos formular la conclusión siguiente: *Cuanto mayor es el volumen encontrado por rayos directos, menor es la calidad de los*

rayos difusos en el rayo central. La relación entre la cantidad de los rayos difusos y el volumen irradiado, ya fué determinada por varios autores y confirmada por los resultados de este trabajo, como lo muestran las tablas II y VII. Ahora bien, cuando hay una relación entre la calidad de los rayos difusos y un cierto volumen, debe encontrarse también una relación entre la calidad y un segmento que puede imaginarse como el término medio de las distancias que tienen que recorrer los rayos difusos hasta el rayo central.

Si se imagina cortada la pirámide de radiación total por una serie de planos perpendiculares a su eje, se obtienen en los mismos varios círculos, cuyos radios se pueden calcular fácilmente; sea a el radio general de estos círculos. Las pirámides, no encontradas por rayos directos, cortarían también círculos, concéntricos a los primeros, con un radio dado para cada profundidad; sea b el radio general. Como se trataba en la determinación de la calidad solamente de un valor término medio, se puede aceptar para las dos longitudes a y b , que son los dos límites de los caminos, que tienen que recorrer los rayos difusos, un término medio también, dado por la expresión $\frac{a+b}{2}$ para cada centímetro de profundidad.

Llegamos al resultado simple que los valores de la columna 2 de las tablas X hasta XV, es decir el porcentaje de la radiación difusa que pasa por el filtro de 1 milímetro de cobre, están en razón inversa de los cuadrados de los términos medios de sus distancias relativas al rayo central. Midiendo bien las distancias a y b para 0 centímetros de profundidad, resultan para los términos medios : 5,45, 6,4, 7,3 y 8,2 centímetros para la pirámide grande, y 3,75 y 4,7 centímetros para la pequeña. Las distancias relativas para las otras profundidades del agua se pueden calcular fácilmente. La ecuación general es :

$$\frac{p \left(\frac{a+b}{2} \right)^2}{\left(\frac{a+b_1}{2} \right)^2} = p_1 = \frac{p(a+b)^2}{(a+b_1)^2},$$

donde p es el porcentaje de la radiación difusa, que pasa por 1 milímetro de cobre a cualquier profundidad del agua y a la distancia $\frac{a+b}{2}$ del rayo central, y p_1 el porcentaje buscado a la misma profundidad pero a la distancia $\frac{a+b_1}{2}$ del rayo central. Para el volumen 0, no encontrado por ra-

ynos directos, b es igual a 0, y el término medio de la distancia igual a $\frac{a}{2}$.

En la tabla XVI se encuentran los valores de los porcentajes de la radiación, pasada por 1 milímetro de cobre, sacados de las tablas X hasta XV, tomando como conocidos los valores para los volúmenes de 947,5 y 160 centímetros cúbicos. Los valores calculados con la ecuación dada para el volumen 0, no encontrado por rayos directos, se encuentran en la tabla XVII. Los números colocados encima de las columnas de la tabla XVI se refieren a las tablas anteriores con igual numeración.

TABLA XVI
Comparación de los valores observados y calculados

Profundidad en centímetros	X		XI		XII		XIII		XIV		XV	
	Observados	Calculados	Observados	Calculados	Observados	Calculados	Observados	Calculados	Observados	Calculados	Observados	Calculados
0	21,0	21,0	17,8	17,7	15,6	15,5	13,7	13,7	25,2	25,2	20,0	20,2
2	19,8	19,8	16,9	16,7	14,5	14,7	12,9	13,0	24,6	24,6	19,2	19,6
4	19,8	19,8	16,9	16,7	14,5	14,7	12,9	13,0	24,1	24,1	18,7	19,2
6	21,0	21,0	17,8	17,7	15,6	15,5	13,7	13,7	24,8	24,8	19,8	19,7
8	21,5	21,5	18,6	18,1	16,2	15,8	14,5	14,1	25,6	25,6	20,8	20,4
10	22,0	22,0	19,1	18,8	16,6	16,2	15,3	14,4	26,7	26,7	21,3	21,3
12	22,4	22,4	18,8	17,2	16,5	16,1	16,1	14,6	27,0	27,0	21,8	21,5

Los valores observados y calculados de las columnas X y XV coinciden porque son los que han servido para establecer la fórmula.

TABLA XVII
Los porcentajes para los dos volúmenes 0 de la radiación difusa que pasa a través de 1 milímetro de cobre

Profundidad en centímetros	Pirámide grande	Pirámide pequeña
0	34,4	35,2
2	32,0	34,0
4	32,0	33,5
6	34,4	34,5
8	35,0	35,5
10	36,1	37,0
12	36,5	37,4

La concordancia de los resultados de la tabla XVI, calculados y observados, es bastante buena para justificar la teoría indicada. La tabla XVII muestra que la calidad de los rayos difusos es muy inferior a la de la radiación total, y más todavía a la de la radiación primaria. En la tabla I fué indicada como longitud efectiva del haz primario 0,1545 U. A., la que corresponde a un porcentaje, pasando por el filtro de 1 milímetro de cobre, de 47,5 por ciento, lo que es debido a la repartición cuantitativa de los dos componentes de la radiación total. Así resulta con esta longitud relativamente favorable de la radiación primaria, y con la longitud poco favorable de la radiación difusa, una longitud efectiva no mayor de 0,1700 U. A. hasta la profundidad medida de 12 centímetros. Como se conoce gracias a los resultados obtenidos, la repartición de la energía en sentido cuantitativo y cualitativo, se puede calcular también la calidad de la radiación total para cada centímetro del rayo central. La tabla XVIII da estos resultados para la pirámide grande y la tabla XIX para la pequeña.

TABLA XVIII

Profundidad en centímetros	Cantidad de rayos primarios en por ciento	Cantidad de rayos secundarios en por ciento	Calidad de los rayos primarios (¹)	Calidad de los rayos secundarios (¹)	Calidad de la radiación total en U. A.
0	100,0	50,1	47,5	34,4	0,162
2	64,0	77,8	47,5	32,0	0,169
4	41,0	76,8	47,5	32,0	0,172
6	26,3	69,5	47,5	34,4	0,170
8	17,0	57,0	47,5	35,0	0,171
10	11,0	44,2	47,5	36,1	0,170
12	7,1	36,6	47,5	36,5	0,170

(¹) Las calidades están dadas por el porcentaje de rayos que pasan por 1 milímetro de cobre, según el método de Duane.

TABLA XIX

Profundidad en centímetros	Cantidad de rayos primarios en por ciento	Cantidad de rayos secundarios en por ciento	Calidad de los rayos primarios (¹)	Calidad de los rayos secundarios (¹)	Calidad de la radiación total en U. A.
0	100,0	37,5	47,5	35,2	0,160
2	64,0	58,6	47,5	34,0	0,166
4	41,0	63,5	47,5	33,5	0,170
6	26,3	56,3	47,5	34,5	0,170
8	17,0	41,2	47,5	35,5	0,170
10	11,0	35,2	47,5	37,0	0,168
12	7,1	26,0	47,5	37,4	0,168

De las dos últimas tablas se deduce que la mayor calidad de la radiación total pertenece a la pirámide más pequeña. En mayores profundidades del agua parece existir un cierto equilibrio de la calidad. En las pirámides usadas existe la mejor calidad directamente debajo de la superficie del agua, hasta una profundidad de 3 centímetros, más o menos.

Si se comparan, por fin, los valores de la calidad de la tabla XVIII con las calidades para 5 y 10 centímetros de profundidad, dadas en la tabla I, resulta para la profundidad de 5 centímetros una pequeña diferencia en favor del dispositivo de experimentación de la figura 4. Pero ya se ha dicho en la descripción de los experimentos preliminares, que en el dispositivo no se miden los rayos que van en sentido inverso a los rayos primarios, y es justamente en esta parte donde tenía que aumentar la longitud efectiva, según la teoría de Compton y Debye, lo que resulta también de los experimentos generales. En la profundidad de 10 centímetros ya existe concordancia.

CONCLUSIONES

Se describe un dispositivo de experimentación que permite medir la calidad y la cantidad de los rayos difusos en el agua, separados de la radiación primaria.

Resulta buena concordancia entre los resultados observados y calculados respecto a la calidad y la cantidad.

En pirámides grandes y pequeñas se encuentra un máximo de energía

(¹) Los valores de estas dos columnas son los porcentajes de los rayos directos y difusos, pasando por 1 milímetro de cobre, según el método de Duane.

a una profundidad de 1 centímetro, más o menos, que aumenta con el volumen irradiado.

Para la radiación difusa sola existe este máximo a una profundidad de 3 centímetros, el que parece acercarse a la superficie del agua para volúmenes más grandes, no encontrados por rayos directos. El efecto de las radiaciones primarias y secundarias juntas, es la causa de que se encuentre el máximo más arriba.

Los logaritmos de las corrientes de ionización producidos por los rayos difusos, son inversamente proporcionales a los volúmenes, no encontrados por rayos directos, desde 0,5 litros. El trazado más deprimido de las curvas entre 0 y 0,5 litros es debido, por una parte, a la posición de la cámara de ionización en la superficie del agua y, por otra, a la falta de radiación difusa sobre el agua.

Para la calidad de los rayos difusos, determinada según el método de Duane, resulta un mínimo en todos los puntos que muestran un máximo de la cantidad. La longitud efectiva de la radiación difusa es mucho mayor que la de la radiación primaria.

Cuando se conoce para cualquier volumen, no encontrado por rayos directos, la calidad a cualquier profundidad en el rayo central, se puede calcular con auxilio de una fórmula sencilla dada, la calidad a la misma profundidad, pero para otro volumen, no encontrado por rayos directos. Las calidades son inversamente proporcionales al cuadrado del término medio del camino que tienen que recorrer los valores términos medios de los rayos difusos. Para el límite del volumen, no encontrado por rayos directos, el cálculo solamente da la calidad.

La calidad de la radiación total queda constante desde 4 centímetros, más o menos, pero pierde casi el 10 por ciento del valor de la radiación primaria respecto a la longitud efectiva.

FEDERICO VIERHELLER.